

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный университет им. А.М. Горького»

ИОНЦ «Физика в биологии и медицине»

Физический факультет

Кафедра физики низких температур
Кафедра общей и молекулярной физики

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

программы дополнительного образования

«Инновационные технологии получения технических газов.

Теоретические основы современных методов разделения воздуха»

(повышение квалификации по направлению 220600 «Инноватика»)

Екатеринбург

2007

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ИОНЦ
«Физика в биологии и медицине»
_____ А.Н.Бабушкин
(подпись)
«28» сентября 2007 года

Программа дополнительного образования (повышение квалификации по направлению 220600 «Инноватика») **«Инновационные технологии получения технических газов. Теоретические основы современных методов разделения воздуха»**

Общая трудоемкость 72 часа, в том числе:

Лекций 60 часов

Квалификационная работа 12 часов

Разработчики

Бабушкин А.Н., д.ф.-м.н., профессор, кафедра физики низких температур, УрГУ
Борисов С.Ф., д.ф.-м.н., профессор, кафедра общей и молекулярной физики, УрГУ
Гречнев В.Т., начальник криогенной станции, кафедра физики низких температур, УрГУ
Мельникова Н.В., к.ф.-м.н., доцент, кафедра физики низких температур, УрГУ
Черняк В.Г., д.ф.-м.н., профессор, кафедра общей и молекулярной физики, УрГУ

Рекомендовано к печати протоколом заседания
Экспертно-конкурсной комиссии ИОНЦ «Физика в биологии и медицине»
от _____ № _____.
(дата)

Заведующий кафедрой общей и молекулярной физики, профессор _____ С.Ф.Борисов

Заведующий кафедрой физики низких температур, профессор _____ А.Н.Бабушкин

(С) Уральский государственный университет

(С) Бабушкин А.Н., Борисов С.Ф., Черняк В.Г., Мельникова Н.В., Гречнев В.Т.

I. Введение

1. Цель программы - рассмотреть физические основы и термодинамические принципы ожижения газов и построения криогенных систем, классические схемы организации криогенных рефрижераторов и ожижителей и методы расчета их характеристик, физические основы работы и техническое устройство газовых криогенных машин. Проанализировать тенденции и перспективы развития этой отрасли техники. Рассмотреть принципиальные схемы криогенной аппаратуры, систем хранения и транспортирования криогенных хладагентов. Продемонстрировать принцип работы датчиков измерения криогенных температур, давления, потока газа в криогенных системах.

2. Задачи программы - дать слушателям сведения о физических процессах, лежащих в основе методов глубокого охлаждения и сжижения газов, а также о способах и технических устройствах для их практической реализации. Показать термодинамические основы построения циклов криогенных устройств. Познакомить с наиболее распространенными вторичными приборами для измерения низких температур и особенностями применения их в физическом эксперименте. Дать слушателям сведения о конкретных циклах современных криогенных ожижителей, их назначении, условиях эксплуатации, характеристиках и техническом устройстве. Познакомить с устройством и принципом работы криогенных систем Уральского государственного университета. Дать слушателям основные представления об основах охраны труда и техники безопасности при работе с криогенными системами и криогенными жидкостями.

3. Уровень образования, необходимый для освоения программы. Предполагается, что слушателями программы являются инженеры, эксплуатирующие промышленные криогенные установки и имеющие высшее техническое образование, общие представления о молекулярной физике, термодинамике, высшей математике.

4. Требования к уровню освоения содержания программы (приобретаемые компетенции, знания, умения, навыки). В результате реализации программы

слушатели получают новые сведения о физических принципах работы воздуходелительных установок, поставят в соответствие свой опыт с теоретическими знаниями о процессах, протекающих при ожижении газов, научатся делать теоретические оценки эффективности эксплуатации криогенных установок.

5. Методическая новизна программы (новые методики, формы работы, авторские приемы в преподавании). Программа разработана по заявке ОАО «Криогенмаш» для повышения теоретической подготовленности инженерно-технического персонала предприятия и подготовки нового персонала. При разработке программы использованы современные представления о криогенной воздуходелительной технике. Учитывается, что слушателями являются взрослые люди, имеющие, как правило, опыт практической работы на воздуходелительных установках.

II. Разделы программы, темы, их краткое содержание

1. Основные положения молекулярной физики и теплофизики

1.1 Идеальный газ. Основные положения молекулярно-кинетической теории. Атомная единица массы. Относительная молекулярная (атомная) масса. Молярная масса. Количество вещества. Модель идеального газа. Микроскопические и макроскопические параметры. Давление газа. Закон Дальтона. Температура. Температурные шкалы Цельсия, Кельвина, Фаренгейта. Уравнение состояния Клапейрона-Менделеева. Изопроцессы в идеальном газе: изотермический, изобарный, изохорный и адиабатный процессы.

1.2. Основы термодинамики. Термодинамические системы: изолированные, закрытые, адиабатные, открытые. Внутренняя энергия. Количество теплоты. Теплоемкость. Работа термодинамической системы. Первый закон (начало) термодинамики. Применение первого закона термодинамики к различным процессам в идеальном газе. Принцип работы периодических тепловых

двигателей. Второе начало термодинамики (формулировка Кельвина). Термодинамическое и статистическое определения энтропии. Формула Больцмана для энтропии. Принцип возрастания энтропии для замкнутых изолированных систем. Фазовые переходы. Агрегатные состояния вещества. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Испарение и конденсация. Критическая точка. Фазовое равновесие и фазовые переходы, теплота фазового перехода. Уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Эффект Джоуля — Томсона, сжижение газов. Диаграммы состояния простой системы, тройная точка, метастабильные состояния вещества.

1.3. Основы теплообмена. Элементы гидродинамики. Уравнение неразрывности. Модель идеальной жидкости. Линия тока и трубка тока. Уравнение Бернулли. Вязкость. Ламинарное и турбулентное течения жидкости. Критерий Рейнольдса. Течение вязкой жидкости в трубе. Закон Пуазейля. Теплообмен. Механизмы теплообмена. Теплопроводность. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности газов, жидкостей и твердых тел. Конвективный теплообмен. Теплоотдача. Закон Ньютона-Рихмана. Вынужденная конвекция. Свободная конвекция. Критерии Нуссельта, Прандтля, Грасгофа. Лучистый теплообмен. Закон Стефана-Больцмана. Излучательная способность материалов. Сложный теплообмен.

1.4. Основы вакуумной техники. Разреженные газы, вакуум, вакуумные устройства в криогенной технике. Сосуды Дьюара. Вакуумные насосы. Методы измерения вакуума.

2. Принципы получения продуктов разделения воздуха

2.1. Термодинамические диаграммы веществ. Поверхность состояний. Области существования газообразного, твердого и жидкого состояний. Свойства веществ в области фазовых переходов. Диаграммы давление-температура, давление-объем, температура-энтропия, энтальпия-энтропия и представление термодинамических процессов (изотермический, изобарный, изохорный,

адиабатический, изохорный) на этих диаграммах. Изменение физических характеристик криогенных хладагентов в области фазовых переходов. Равновесные состояния и термодинамические диаграммы бинарных систем.

2.2. Физические принципы глубокого охлаждения газов.

Термодинамические особенности процесса охлаждения в низкотемпературной области. Холодильные термодинамические циклы. Холодопроизводительность, холодильный коэффициент, термодинамический КПД. Изотермическое сжатие реального газа как составная часть криогенного цикла. Компрессоры. Процесс дросселирования идеального и реального газа. Холодопроизводительность процесса. Изображение процесса на диаграмме температура-энтропия. Основы расчета дроссельных систем. Условия получения положительного и отрицательного эффектов Джоуля-Томсона. Условия получения максимального охлаждения. Холодопроизводительность процесса дросселирования. Процесс расширения идеального и реального газа при условии постоянства внутренней энергии. Холодопроизводительность процесса. Поршневые детандеры. Принципиальное устройство. Основные характеристики. Основные виды потерь в поршневых детандерах. Турбодетандеры. Принципиальное устройство и основные разновидности. Сравнительная характеристика поршневых и турбодетандеров. Общая характеристика процессов в турбодетандерах. Изображение процессов на диаграммах энтальпия-энтропия. Основные виды потерь. Процесс свободного выпуска газа из баллона. Процесс впуска. Термодинамическая характеристика процессов и анализ возможностей включения их в криогенный цикл. Экспансионный множитель Ф.Симона как криогенная система, реализующая процесс выхлопа. Основные процессы на диаграмме температура-энтропия. Испарение конденсированной фазы с непрерывным отводом пара. Десорбционное охлаждение, его техническое осуществление и основные характеристики. Минимальная работа криогенной системы. Основные термодинамические характеристики холодильного цикла. Характеристики реальных криогенных циклов. Идеальные циклы криогенных систем: криогенное термостатирование, охлаждение, ожижение.

2.3. Основы термодинамического расчета криогенных систем.

Метод энергетического баланса для расчета криогенных систем. Уравнения энергетического баланса для отдельных ступеней охлаждения: ступени предварительного охлаждения, детандирования, дросселирования. Ступени рефрижераторных и ожижительных циклов.

2.4. Классические схемы криогенных рефрижераторов и ожижителей.

Криогенное разделение газовых смесей. Принципы осуществления, основные технические устройства и области применения. Однопоточный каскадный цикл с дросселированием газовой смеси. Циклы с предварительным охлаждением, дросселированием и детандированием. Термодинамические характеристики наиболее распространенных схем. Циклы с параллельным включением детандеров. Циклы с турбодетандерами. Детандерные циклы. Простой детандерный цикл. Детандирование с двумя ступенями охлаждения. Комбинированные дроссельно-детандерные циклы. Циклы Клода-Гейландта среднего и высокого давлений. Цикл низкого давления с турбодетандером. Циклы Коллинса, влияние числа ступеней на термодинамическую эффективность цикла. Циклы с дросселированием. Цикл Линде-Хемпсона. Роль регенеративного теплообмена. Цикл с предварительным охлаждением и дросселированием.

2.5. Основы низкотемпературной термометрии.

Термодинамические принципы построения температурной шкалы. Практические температурные шкалы. Абсолютная термодинамическая шкала температур. Возможность ее воспроизведения. Первичные и вторичные термометры. Точность, чувствительность, стабильность термометров. Газовый термометр. Газовая термометрия с реальным газом. Международная практическая шкала температур. Единственность МПТШ-68 и отклонения от абсолютной термодинамической шкалы при низких температурах. Основные реперные точки МПТШ-68 и методы их реализации. Установление температурной шкалы в

интервале между реперными точками. Стандартизация измерений низких температур. Платиновый термометр сопротивления. Термометры сопротивления на основе полупроводников. Германиевые термометры сопротивления. Термоэлектрические термометры для измерения низких температур. Материалы для термоэлектродов. Требования стандартизации термоэлектрических измерений. Основные источники погрешностей при измерении температуры термопарами. Градуировка низкотемпературных электрических термометров.

2.6. Состав воздуха. Практическая значимость продуктов разделения воздуха. Концентрация газов, входящих в состав воздуха. Примеси, загрязняющие воздух, их влияние на работу воздуходелительных установок. Предварительная очистка воздуха (скрубберы). Методы предварительной очистки воздуха. Адсорбенты. Блок комплексной очистки. Принципиальная схема, алгоритм работы. Оборудование системы распределения, хранения и транспортировки продуктов разделения воздуха. Приборы контроля технологического процесса (приборы измерения температуры, давления, расхода среды, газоанализаторы). Принцип работы хроматографа. Система контроля и управления. АСУТП, АСКУ. Технологические защиты и блокировки. Релейные защиты.

3. Обеспечение безопасности работы воздуходелительных установок (ВРУ)

Причины возникновения нарушений в работе ВРУ. Взаимодействие продуктов разделения воздуха с различными веществами. Контроль загрязненности воздуха. Мониторинг состояния воздушной среды. Требования к размещению цехов с ВРУ. Основные технологические причины возникновения взрывоопасных условий в конденсаторах-испарителях. Современные способы обеспечения взрыво-безопасности ВРУ.

4. Вопросы техники безопасности при работе на воздуходелительных установках

Охрана труда. Требования к персоналу. Опасные производственные факторы при работе на ВРУ. Вредные производственные факторы при работе на ВРУ. Безопасность труда при работе с ЛВЖ и ГЖ. Вопросы электробезопасности (опасность поражения электрическим током). Безопасность при работе с вращающимися механизмами. Безопасность при работе на высоте. Меры по оказанию первой помощи пострадавшим. Безопасность при работе внутри сосудов, колодцев, туннелей, котлов. Средства защиты органов дыхания, слуха, зрения, применяемые на производствах с повышенной опасностью. Безопасность при, хранении и транспортировке продуктов разделения воздуха.

5. Знакомство с установками КГУ и АЖА, устройствами хранения и транспортирования криогенных хладагентов.

III РАБОЧИЙ ПЛАН

Раздел	Аудиторные занятия, час.
1. Идеальный газ. 6 часов	
Основные положения молекулярно-кинетической теории. Атомная единица массы. Относительная молекулярная (атомная) масса. Молярная масса. Количество вещества. Решение задач.	2
Модель идеального газа. Микроскопические и макроскопические параметры. Давление газа. Закон Дальтона. Температура. Температурные шкалы Цельсия, Кельвина, Фаренгейта. Решение задач.	2
Уравнение состояния Клапейрона-Менделеева. Изопроцессы в идеальном газе: изотермический, изобарный, изохорный и адиабатный процессы. Решение задач.	2
2. Основы термодинамики 10 часов	

Термодинамические системы: изолированные, закрытые, адиабатные, открытые. Внутренняя энергия. Количество теплоты. Теплоемкость. Работа термодинамической системы. Первый закон (начало) термодинамики. Применение первого закона термодинамики к различным процессам в идеальном газе. Решение задач.	4
Принцип работы периодических тепловых двигателей. Второе начало термодинамики (формулировка Кельвина). Термодинамическое и статистическое определения энтропии. Формула Больцмана для энтропии. Принцип возрастания энтропии для замкнутых изолированных систем. Решение задач.	3
Фазовые переходы. Агрегатные состояния вещества. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Испарение и конденсация. Критическая точка. Фазовое равновесие и фазовые переходы, теплота фазового перехода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Эффект Джоуля — Томсона, сжижение газов. Диаграммы состояния простой системы, тройная точка, метастабильные состояния вещества. Решение задач.	3
3. Основы тепломассообмена 8 часов	
Элементы гидродинамики. Уравнение неразрывности. Модель идеальной жидкости. Линия тока и трубка тока. Уравнение Бернулли. Вязкость. Ламинарное и турбулентное течения жидкости. Критерий Рейнольдса. Течение вязкой жидкости в трубе. Закон Пуазейля. Решение задач.	3

Теплообмен. Механизмы теплообмена. Теплопроводность. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности газов, жидкостей и твердых тел. Конвективный теплообмен. Теплоотдача. Закон Ньютона-Рихмана. Вынужденная конвекция. Свободная конвекция. Критерии Нуссельта, Прандтля, Грасгофа. Лучистый теплообмен. Закон Стефана-Больцмана. Излучательная способность материалов. Сложный теплообмен. Решение задач.	3
Разреженные газы, вакуум, вакуумные устройства в криогенной технике: сосуды Дьюара, вакуумные насосы. Практическое занятие в лаборатории молекулярной физики.	2
4. Принципы получения продуктов разделения воздуха 1.5 часа	
Состав воздуха (концентрация газов, входящих в состав воздуха). Практическая значимость продуктов разделения воздуха. Объемы получаемых основных продуктов разделения воздуха в масштабе мирового производства	0,5
Основные методы получения продуктов разделения воздуха: криогенный, адсорбционный, диффузионный.	1
5. Криогенное разделение воздуха 5.5. часов	
Проблемы получения кислорода, азота и др. продуктов разделения воздуха – проблемы получения холода. Температуры, используемые в холодильной технике. Криогенные температуры. Общий принцип охлаждения. Охлаждение газов методами изоэнтропного расширения (детандирования), дросселирования и выхлопа. Сравнение эффективности методов.	1
Ожижение газов. Ожижительные циклы. Цикл Линде. Цикл Клода. Принципиальные схемы воздушных ожижителей Гемпсона, Линде, Клода.	2

Свойства криогенных жидкостей: азот, кислород, водород, гелий (коротко). Характерные температуры, теплота испарения, особенности.	1
Принцип работы криогенных воздухоразделительных установок. Анализ схемно-конструктивных решений.	1,5
6. Состав и принципиальное устройство оборудования криогенных воздухоразделительных установок (ВРУ) 17 часов	
Скрубберы. Предварительная очистка воздуха от загрязняющих его примесей. Влияние примесей на работу ВРУ. Методы предварительной очистки. воздуха. Адсорбенты.	2
Блок комплексной очистки, Принципиальная схема. Алгоритм работы.	1
Теплообменное оборудование (охладители воздух-вода, регенераторы).	2
Холодильная установка	2
Компрессорные машины. Турбокомпрессор.	2
Расширительные машины. Турбодетандер.	2
Оборудование системы распределения, хранения и транспортировки продуктов разделения воздуха.	2
Приборы контроля технологического процесса (приборы измерения температуры, давления, расхода среды, газоанализаторы). Принцип работы хроматографа.	2
Система контроля и управления. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП). Автоматизированная система контроля и управления (АСКУ). Технологические защиты и блокировки. Релейные защиты.	2
7. Обеспечение безопасности работы воздухоразделительных установок (ВРУ) 8 часов	
Причины возникновения нарушений в работе ВРУ.	8 часов

Взаимодействие продуктов разделения воздуха с различными веществами.	
Контроль загрязненности воздуха. Мониторинг состояния воздушной среды. Требования к размещению цехов с ВРУ.	
Основные технологические причины возникновения взрывоопасных условий в конденсаторах-испарителях.	
Современные способы обеспечения взрывобезопасности	
8. Вопросы техники безопасности при работе на воздухоразделительных установках (ВРУ) 4 часа	
Охрана труда.	4 часа
Требования к персоналу.	
Опасные производственные факторы при работе на ВРУ.	
Вредные производственные факторы при работе на ВРУ.	
Безопасность труда при работе с ЛВЖ и ГЖ.	
Вопросы электробезопасности (опасность поражения электрическим током).	
Безопасность при работе с вращающимися механизмами.	
Безопасность при работе на высоте.	
Меры по оказанию первой помощи пострадавшим.	
Безопасность при работе внутри сосудов, колодцев, туннелей, котлов.	
Средства защиты органов дыхания, слуха, зрения, применяемые на производствах с повышенной	
Безопасность при, хранении и транспортировке продуктов разделения воздуха.	
9. Подготовка и защита реферата	12

IV. Форма итогового контроля

Защита реферата

V. Учебно-методическое обеспечение

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М., 1997.
2. Сивухин Д. В. Термодинамика и молекулярная физика. М., 1990.
3. Кикоин А. К, Кикоин И. К. Молекулярная физика. М., 1976.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. Молекулярная физика и

термодинамика. М.: Астрель-АСТ, 2001.

5. Баррон Р.Ф. Криогенные системы. М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Архаров А.М., Беляков В.П. и др. Криогенные системы. Основы проектирования аппаратов и установок. М.: Машиностроение, 1987.
7. Орлова Н.П., Погорелова О.Ф., Улыбин С.А. Низкотемпературная термометрия. М.: Энергоатомиздат, 1987.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Куинн Т. Температура.- М.: Мир, 1985.
2. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами. - М.: Энергия, 1980.
3. Методы получения и измерения низких температур и сверхнизких температур/ Под ред. Б.И.Веркина.- Киев: Наукова Думка, 1987.
5. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М.П.Малкова - М.: Энергия, 1985.
7. Каганер М.Г. Тепломассообмен в низкотемпературных конструкциях.- М.: Энергия, 1979.
9. Микулин Е.И. Криогенная техника. - М.: Энергия, 1979.
10. Технические описания воздухоразделительных установок.
11. Нормативная литература по охране труда и технике безопасности при работе с воздухоразделительными установками и криогенными жидкостями.

III. Ресурсное обеспечение

Учебно-производственная лаборатория «Криогенная станция», лаборатории кафедры физики низких температур и общей и молекулярной физики. Компьютерный класс «Диалог».